

В.С.ГЛАДКОВ, канд.техн.наук; **П.Н.МЕЛЬНИКОВ**;

В.В.РУДАКОВ, докт.техн.наук; НТУ «ХПИ»;

И.И.МАГДА, докт.физ.-мат.наук, ННЦ «ХФТИ»

ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНОГО ЗАРЯДА МАЛОЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1,0 МВ

Наведено опис створеного джерела заряджання малоємнісної навантаги напругою до 1,0 МВ, яке складається з маслonaповненого генератора імпульсних напруг амплітудою до 1,0 МВ, системи керування, генератора підпалювальних імпульсів та підвищувально-випрямного пристрою. Генератор імпульсів має номінальну напругу амплітудою 1,0 МВ, ємність у розряді 500 пФ, енергія, що запасастся, 250 Дж, власну індуктивність <0,7 мкГн, гарантований ресурс 10^5 циклів «заряд-розряд», тривалість фронту першої напівхвилі напруги 15 нс на навантазі 200 пФ та частоті слідування імпульсів, що генеруються, 1 Гц.

The description of created source of pulsed charging of low-capacitance load with voltage up to 1.0 MV is presented. The source consists of oil-filled generator of pulsed voltages with amplitudes up to 1.0 MV, control system, ignition pulse generator, and stepping-up and rectifying device. The pulse generator has nominal voltage 1.0 MV, discharging capacitance 500 pF, stored energy 250 J, self-inductance <0.7 μ kH, guaranteed resource 10^5 cycles of «charge-discharge», duration of front of first half-wave of voltage 15 ns on the load with capacitance 200 pF, and repetition frequency of generated pulses 1 Hz.

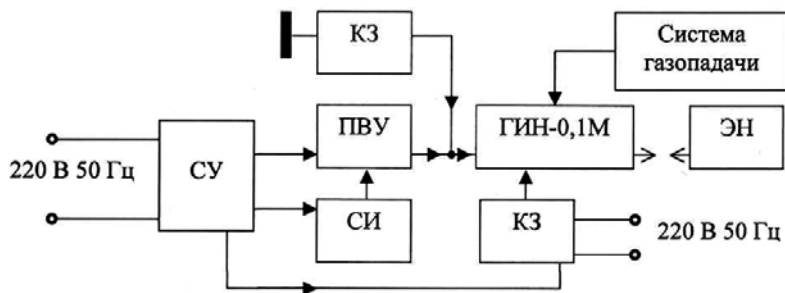
В научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте (НИПКИ) «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ») разработан и создан источник импульсного заряда малоёмкостной нагрузки напряжением до 1,0 МВ (ИИЗ-1,0), состоящий из маслonaполненного генератора импульсных напряжений амплитудой до 1,0 МВ (ГИН-1,0М), повысительно-выпрямительного устройства с выходным напряжением ± 50 кВ (ПВУ-50), системы управления работой ИИЗ-1,0 (СУ) и генератора поджигающих импульсов (ГПИ). ИИЗ-1,0 производит «быстрый заряд» нагрузочной ёмкости величиной 200 пФ, при этом время заряда (первой полуволны импульса напряжения) не превышает 15 нс. Кроме этого, ИИЗ-1,0 содержит в своем составе:

- короткозамыкатель (КЗ);
- систему измерений (СИ);
- эквивалент нагрузки (ЭН) в металлическом корпусе для испытаний ГИН-1,0М.

Принципиальная электрическая схема ИИЗ-1,0 приведена на рис. 1. После включения сетевого напряжения последнее повышается, выпрямляется ПВУ и соответственно заряжает конденсаторы С собственно ГИН-1,0М. При подаче от ГПИ на F1 поджигающего импульса происходит разряд ГИН-1,0М на нагрузку Zн. Регулировка величины зарядного напряжения ГИН-1,0М

[illegible]

ПУ – пульт управления, ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство, ГИН-1,0М – генератор импульсов напряжения, Z_H – нагрузка Заказчика, ГПИ – генератор поджигающих импульсов, $R_{\text{защ}}$ – резистор защитный, В – вентиль, R_3 – резистор зарядный, С – конденсатор, F1 – коммутатор, АТ – автотрансформатор, ВТ – высоковольтный трансформатор



Основным элементом ИИЗ-1,0 является маслonaполненный генератор импульсов напряжения ГИН-1,0М, работающий по схеме Аркадьева-Маркса. Нужно отметить, что в настоящее время резко возросла необходимость использования мегавольтных генераторов импульсов напряжения с наносекундными длительностями фронта для получения мощных электронных пучков и импульсов жесткого рентгеновского излучения, а также питания ин-

дукционных ускорителей, мощных радиоизлучающих устройств и др. При этом возросли требования к стабильности параметров генерируемых импульсов напряжения, особенно к длительности наносекундного фронта импульса. Для создания мегавольтных импульсов с наносекундными длительностями фронтов генераторы должны иметь очень низкую индуктивность, что можно достичь применением низкоиндуктивных высоковольтных конденсаторов и коммутаторов, а также соответствующей компоновкой изоляционной несущей конструкции (ИНК) с целью уменьшения геометрической длины пути разряда. Габариты генераторов, особенно ИНК, определяются в основном габаритами используемых конденсаторов и средой, в которой работает генератор (газ под давлением, трансформаторное масло, воздух и т.п.).

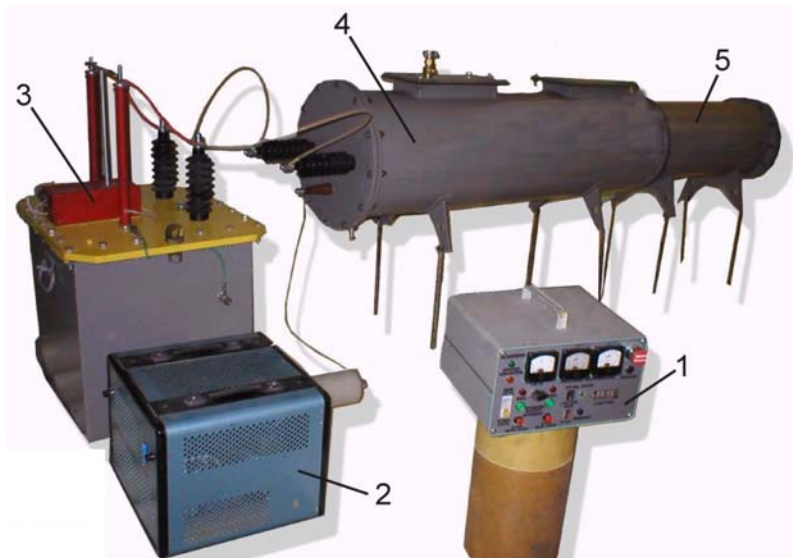


Рисунок 3 – Общий вид ИИЗ-1,0

При создании ГИН-1,0М (с учетом жестких требований по длительности фронта генерируемого импульса напряжения) с целью уменьшения геометрического пути разряда была применена этажерочная ИНК, в качестве несущих элементов которой впервые были использованы изоляционные корпуса специально созданных для данного генератора конденсаторов и коммутаторов, что является отличительной особенностью описываемого генератора. Это позволило уменьшить длину до суммы геометрических размеров конденсаторов и коммутаторов, т.е. свести индуктивность генератора до суммы собственных индуктивностей конденсаторов и коммутаторов. Принципиальная электрическая схема ГИН-1,0М приведена на рис. 4.

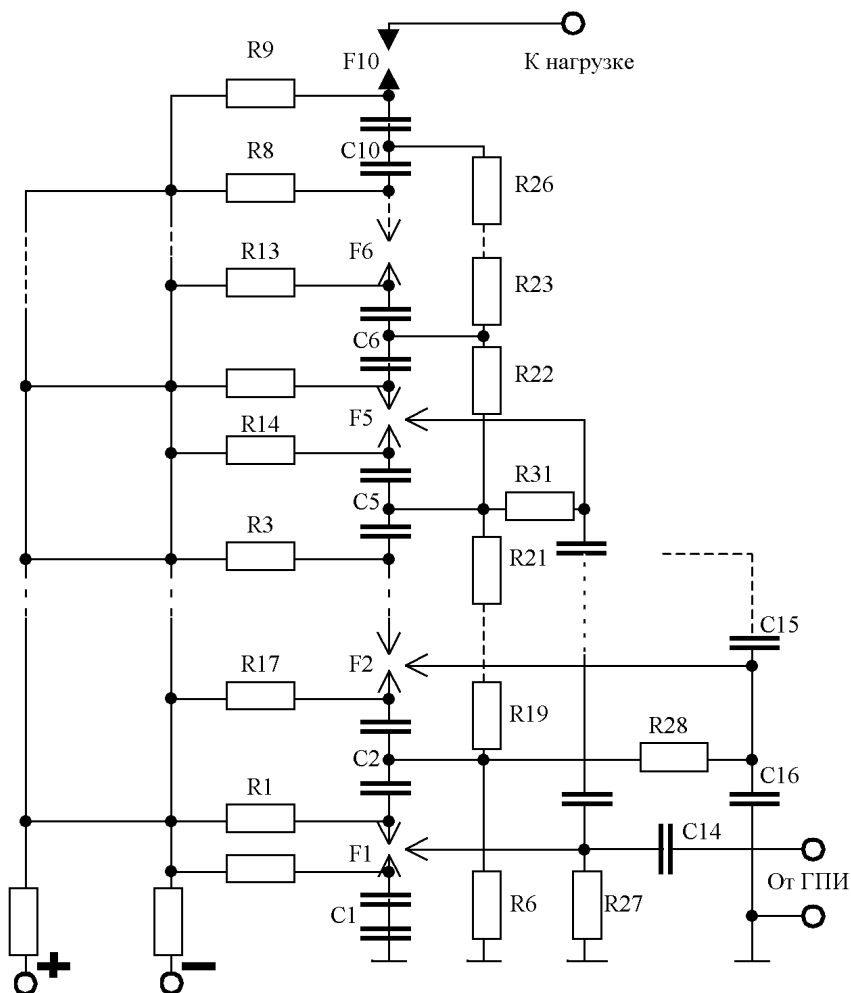


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема ГИН-1,0М:

C1...C10 – конденсаторы типа КИМ-131, R1...R26 – резисторы зарядно-разрядные, F1...F5 – коммутатор трехэлектродный КИТ-100, F6...F10 – коммутатор двухэлектродный типа КИД-100, C12...C16 – конденсаторы пусковые, R27...R31 – резисторы пусковые

Расчеты параметров электрической схемы производились с учетом паразитных параметров на Electronics Workbench. Зарядно-разрядный контур ГИН-1,0М состоит из 10 каскадов (C1...C10) номинальным напряжением 100 кВ. Каждый каскад состоит из специально разработанного конденсатора КИМ-131 и работающих в азоте под давлением коммутаторов трехэлектрод-

ных типа КИТ-100 (F1...F5) и двухэлектродных типа КИД-100 (F6...F10) напряжением 100 кВ каждый. Для обеспечения заряда конденсаторов применены 3 ветви зарядно-разрядных резисторов. Ветви R1...R8 и R9...R17, через которые подается зарядное напряжение от ПВУ, подключены к потенциальным выводам конденсаторов КИМ-131, а заземленная ветвь R16...R26 подключена к средним выводам конденсатора. Для стабильного срабатывания ГИН-1,0М в заданном диапазоне рабочих напряжений на первых 5-ти каскадах применены трехэлектродные управляемые коммутаторы типа КИТ-100. Управляемый запуск генератора осуществляется подачей импульса поджига от ГПИ на средние электроды коммутаторов F1...F5 через 2 ветви конденсаторов C12...C14 и C15...C16. Средние электроды коммутаторов F1...F5 подключены к средним точкам конденсаторов через R27...R31. Конструктивно ГИН-1,0М состоит из заполненного трансформаторным маслом цилиндрического металлического корпуса со смотровыми окнами и расположенного внутри него зарядно-разрядного контура. Общий вид ГИН-1,0М представлен на рис. 5.

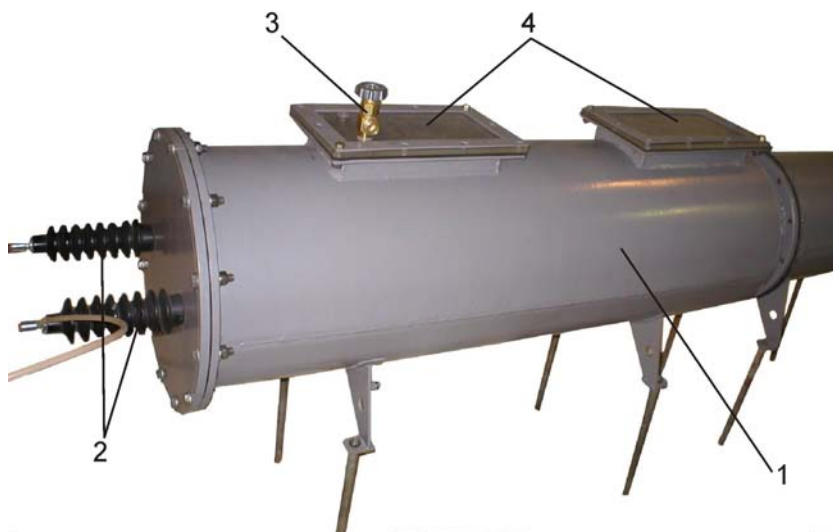


Рисунок 5 – Общий вид ГИН-1,0М (заполненный трансформаторным маслом):
1 – металлический корпус, 2 – проходные изоляторы для подачи напряжения от ПВУ,
3 – кран для подачи азота в систему газоподдачи, 4 – смотровые окна

Зарядно-разрядный контур ГИН-1,0М выполнен в виде отдельной конструкции, состоящей из 10 каскадов «конденсатор-коммутатор», жестко стянутых специальными изоляционными стержнями (см. рис. 6), что позволяет резко сократить время сборки (разборки) всей конструкции. Зарядно-

разрядный контур крепится к изоляционной плате (основанию), являющейся одновременно крышкой металлического корпуса ГИН-1,0М.

Будучи монолитным блоком, зарядно-разрядный контур легко устанавливается в корпусе ГИН-1,0М. Нужно отметить, что разработанная конструкция ГИН-1,0М позволила получить на емкостной нагрузке требуемые амплитудно-временные параметры генерируемого импульса, уменьшив при этом в 1,3 раза заданную минимальную величину длительности фронта импульса.

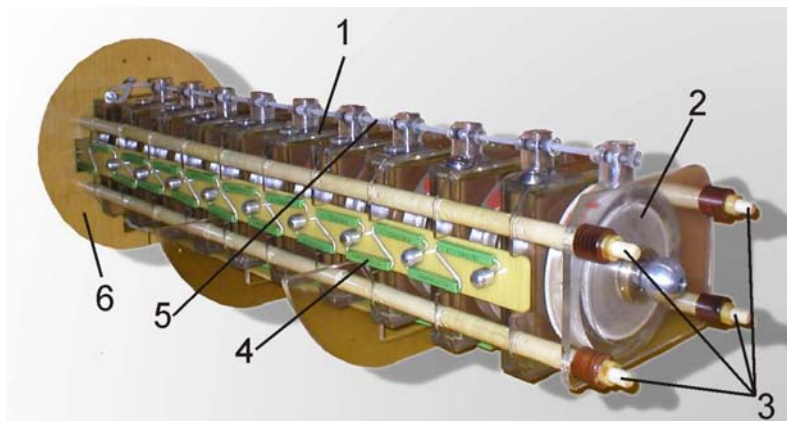


Рисунок 6 – Общий вид зарядно-разрядного контура ГИН-1,0М

1 – конденсатор КИМ-131, 2 – коммутаторы КИТ-100 и КИД-100, 3 – изоляционные стягивающие стержни, 4 – зарядно-разрядные резисторы, 5 – система газоподачи, 6 – плата-основание

Одним из основных элементов ГИН-1,0М является специально разработанный для него высоковольтный малоиндуктивный конденсатор типа КИМ-131. Конденсатор КИМ-131 (рис. 7) предназначен для работы в составе ГИН в масляной среде. Номинальное напряжение конденсатора составляет 100 кВ, емкость между основными выводами – 5 нФ, собственная индуктивность – менее 10 нГн, ресурс конденсатора при надежности 0,9 составляет $5 \cdot 10^4$ циклов «заряд-разряд» в режиме слабозатухающего колебательного разряда с декрементом колебаний более 2. Конденсатор состоит из пакета секций, изоляционного корпуса с четырьмя проушинами для крепления, двух основных латунных выводов, расположенных на противоположных сторонах конденсатора, вспомогательного вывода, расположенного на боковой грани конденсатора.

Пакет конденсатора состоит из двух полупакетов, включенных последовательно. Емкость каждого полупакета составляет 10 нФ, напряжение 50 кВ. Место соединения полупакетов подключено к вспомогательному выводу.

Каждый полупакет состоит из пяти последовательно включенных групп секций, прижимной контактной пластины, припаянной к основному выводу, главной изоляции, обеспечивающей необходимую электрическую прочность по поверхности изоляции внутри пакета. Оценка ресурса при надежности P производилась в предположении логнормального распределения отказов конденсаторной изоляции [1]

$$\lg M_p = \lg M_{cp} - z_p \sigma, \quad (1)$$

где M_{cp} – средний ресурс секции, z_p – квантиль соответствующей заданной надежности P , σ – среднеквадратическое отклонение, зависящее от толщины диэлектрика [1]. Используя выражение (1) выбрано число последовательно соединенных секций, толщина диэлектрика между обкладками, обеспечивающие максимальный ресурс, и рассчитана надежность работы конденсатора при ресурсе $5 \cdot 10^4$. Изоляционный корпус из оргстекла обеспечивает необходимую электрическую прочность по поверхности, а также удерживает пакет секций в сжатом состоянии и значительно упрощает механическую сборку (разборку) ГИН-1,0М с помощью проушин. Основные выводы из конденсатора в виде массивных латунных дисков обеспечивают возможность контактного соединения как с последовательно включенными разрядниками, так и с зарядными элементами (при заряде напряжение на выводах составляет ± 50 кВ, на вспомогательном электроде 0). Для обеспечения надежного контакта в выводе имеется центральное резьбовое отверстие М10.

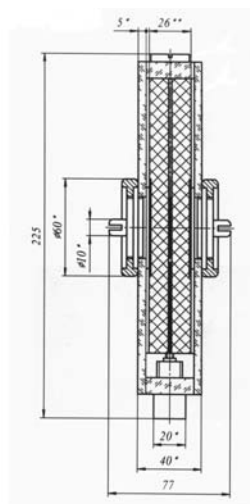
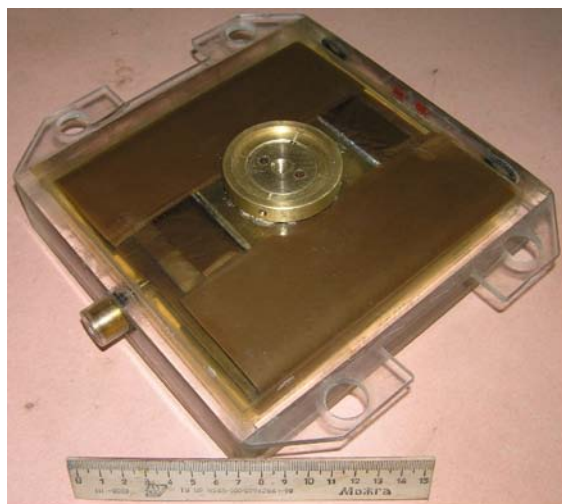


Рисунок 7 – Общий вид конденсатора КИМ-131
1 – внешний вид, 2 – геометрические размеры

Другими ответственными элементами являются двухэлектродные и трехэлектродные коммутаторы соответственно типа КИД-100 и КИТ-100 напряжением 100 кВ (см. рис. 8), подобные по конструкции описанным в [2]. Основной отличительной особенностью коммутаторов является конструкция их выводов, которые позволяют производить непосредственную стыковку с выводами конденсатора КИМ-131. Это дало полностью исключить из контура разряда ГИН-1,0М соединительную ошиновку, то есть минимизировать собственную индуктивность генератора. Кроме этого, оптимизирована как в механическом, так и в электрическом отношении конструкция системы газоподачи, которая целиком выполнена из высокопрочных изоляционных материалов (см. п. 3 рис. 5 и п. 5 рис. 6).



Рисунок 8 – Общий вид коммутатора

При создании повысительно-выпрямительного устройства напряжением ± 50 кВ в его состав (кроме специально разработанного повышающего трансформатора 220/40000 В и высоковольтных вентилях) включены короткозамыкатель и делители выпрямленного напряжения. Конструктивно ПВУ выполнен в виде заполненного трансформаторным мас-

лом металлического бака, внутри которого расположены повышающий трансформатор и вентили с токоограничивающими резисторами, а на изоляционной крышке – проходные изоляторы для подачи выпрямленного напряжения в ГИН-1,0М, высоковольтные делители и короткозамыкатель (см. п. 3 рис. 3). Конструктивно делители напряжения расположены в изоляционных трубах, а выводы от их низковольтных плеч соединены с микроамперметрами ПУ. Короткозамыкатель выполнен в виде подвижных контактов, автоматически замыкающих высоковольтные выводы ПВУ и ГИН-1,0М при отключении напряжения с ИИЗ-1,0. Движение контактов осуществляется тяговым электромагнитом.

Пульт управления СУ, заполненный коммутационной аппаратурой, выполнен в виде отдельного блока (см. п. 1 рис. 3). После подачи напряжения, о чем свидетельствует сигнализация, пульт управляет работой КЗ, включением, регулированием и измерением выпрямленного напряжения микроамперметрами (подключенными к делителям напряжения ПВУ), подает импульс поджига на коммутаторы ГИН-1,0М, как в ручном, так и в автоматическом режимах, с одновременной регистрацией количества разрядов. На передней панели ПУ расположены вольтметр (регистрирует напряжение в первичной обмотке повышающего трансформатора), микроамперметры (регистрируют напряжение заряда ГИН-1,0М в кВ), рукоятка регулирования напряжения заряда, сигнализация и клавиши включения/выключения ГПИ, а также индикатор счетчика импульсов и кнопка «Аварийное отключение». На заднюю панель ПУ выведены разъемы для подключения ПВУ, ГПИ, КЗ и СИ.

Генератор поджигающих импульсов изготовлен в виде двух блоков – блока управления и высоковольтного генератора поджигающих импульсов. Блок управления конструктивно расположен в ПУ (с переключателем «Ручной пуск – Автоматический пуск», индикатором счетчика импульсов и кнопкой «Ручной пуск»). Высоковольтный генератор поджигающих импульсов (вместе с высоковольтным импульсным трансформатором напряжением 80 кВ) выполнен в виде отдельного элемента (см. п. 2 рис. 3).

Для исследования и испытания ИИЗ-1,0 изготовлен эквивалент нагрузки, который пристыковывается к ГИН-1,0М при испытаниях и состоит из последовательно соединенных конденсаторов К15-10, размещенных в залитом трансформаторным маслом металлическом корпусе (см. п. 5 рис. 3).

Созданный источник импульсного заряда ИИЗ-1,0 (см. рис. 3) генерирует на нагрузке емкостью 200 пФ и индуктивностью 100 нГ колебательный затухающий импульс напряжения со следующими параметрами:

- длительность фронта, определяемая на уровне 0,1...0,9 амплитудного значения первой полуволны напряжения (см. рис. 9), нс..... 15, 0

- максимальное значение амплитуды первой полуволны напряжения, МВ 1,0
- гарантированный режим работы, циклы «заряд-разряд» 10^5
- коэффициент управляемости 1,9
- режимы работы ручной и автоматический с частотой следования импульсов 1 Гц

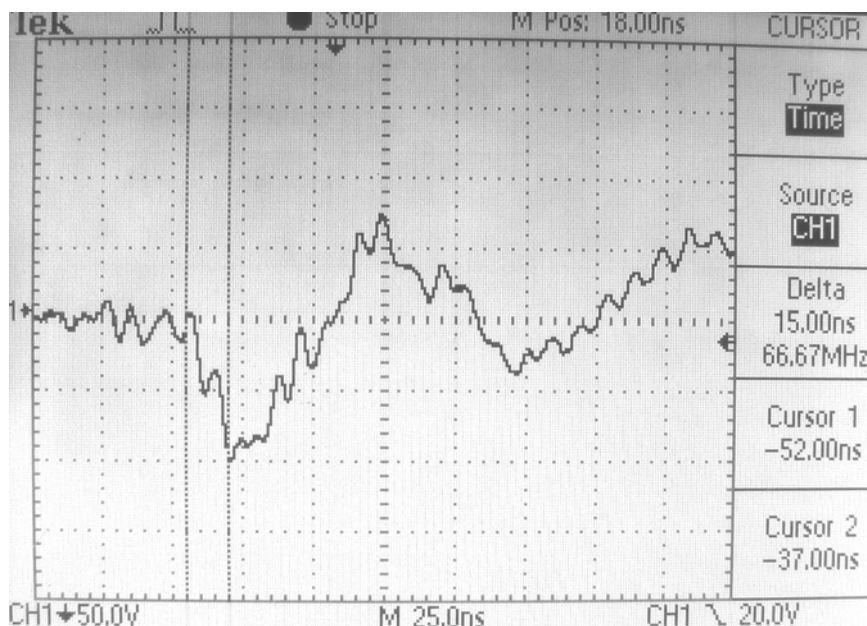


Рисунок 9 – Осциллограмма первой полуволны импульса тока на эквиваленте нагрузки

Нужно отметить, что созданный источник импульсного заряда типа ИИЗ-1,0 может быть использован для создания мегавольтных импульсов напряжения с длительностями фронтов порядка 1 нс (и меньше) при соответствующей его доработке обостряющими устройствами.

Список литературы: 1. Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В. Электротехника и электромеханика. – Харьков. – 2006. – № 1. – С. 71-75. 2. Бочаров В.А., Пекарь И.Р., Мельников П.Н. Приборы и техника эксперимента. – Москва, 1986. – № 5. – С. 104-106.

Поступила в редколлегию 20.11.2007